

SISTEMA DE MEDICION DE HUMEDAD

Cadena*, Carlos; Cavalli Delgado*, Duilio; Saravia†, Luis
INENCO** - CONICET
Universida Nacional de Salta - Buenos Aires 177 - 4400 Salta
Fax 087-255489; e-mail: cadena @ ciunsa.edu.ar

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de un equipo para determinar la humedad relativa por medio de un método indirecto, determinando "*el punto de rocto de un espejo*". Se desarrolla la forma de realizar dichas medidas disponiendo de termómetros electrónicos, y de un dispositivo detector fotoelectrónico. Para realizar las mediciones es imprescindible el uso de una "placa adquisidora de datos", que se utiliza como interfase. Estos son ingresados, leídos, traducidos y luego almacenados para la realización de distintos tipos de análisis en la PC. Tanto la programación de la placa adquisidora de datos, el control que se tiene sobre el equipo medidor, cálculos de valores reales de temperatura, presión atmosférica y el cálculo teórico de humedad, como así también las gráficas de visualización de la variación de los parámetros en la computadora, fueron realizados utilizando Lenguaje C++. Aunque en principio la programación puede realizarse en otros lenguajes. El error del método está provocado casi con exclusividad por la determinación del instante de condensación en el espejo. Los errores en las mediciones de temperaturas, y los provocados por la placa adquisidora pueden despreciarse. El error final en la determinación de la humedad, está por debajo del tres por ciento.

INTRODUCCIÓN

La *humedad* es un parámetro físico cuya medida se puede obtener en forma directa o indirecta, de acuerdo a las características del sensor. Una definición práctica y sencilla puede ser enunciada de la siguiente manera: "la humedad es la medida del vapor de agua presente en un gas". A raíz de esto surgen diferentes tipos de definiciones como la *humedad absoluta* (la masa de vapor de agua presente en un volumen unidad). Consideramos la *humedad relativa* expresada como la relación entre la presión de vapor de agua presente y la presión de agua requerida para la saturación, a una temperatura dada. Esta relación nos permite una más clara y fácil apreciación de parámetro pues se expresa en tanto por ciento, es por eso que la *humedad relativa* es la medida de humedad más comúnmente utilizada incluso en informes meteorológicos. Además es importante destacar la dependencia de este parámetro con la temperatura.

Entre los métodos clásicos de medición de humedad se encuentran los que emplean sensores resistivos o capacitivos, con costos que oscilan entre los doscientos y mil pesos y precisiones variables entre cinco y diez por ciento en los valores extremos de humedad.

El método de medición empleado, que podría definirse como de laboratorio, o como uno de los más precisos, es equivalente al "psicrométrico" con algunas modificaciones, fundamentalmente debido a ciertas complicaciones que existen para medir la temperatura de "bulbo húmedo". Para efectuar la determinación de ese parámetro es necesario mantener la mecha del termómetro permanentemente saturada con agua destilada, manteniendo además el flujo de aire constante. Los parámetros a medir para este caso son la "temperatura ambiente" y la "temperatura del punto de rocío". El error del método psicrométrico, y obviamente su costo, depende entre otras razones de la precisión de los termómetros empleados, y estos pueden ser electrónicos o los clásicos de vidrio.

TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCÍO

Antes de interesarnos en la determinación de la misma, es conveniente tener en claro su significado físico: La "Temperatura del Punto de Rocío" es la temperatura a la cual las fases líquida y vapor de un fluido están en equilibrio (el punto de equilibrio entre las fases vapor y sólido se denomina "punto de escarcha"). También se dice que en éste punto (rocío) se produce la saturación del vapor de agua, tal como se muestra en la figura 1.

La humedad está relacionada con las presiones parciales de vapor, y por la misma causa con las temperaturas del aire húmedo. De allí que en la figura 1 se puede ver que a cada temperatura corresponde una humedad absoluta de saturación. Todo este proceso se realiza manteniendo la presión constante. La curva indicada como "*curva límite*" corresponde al caso en que el vapor de aire está saturado, se la llama también "*curva de saturación*".

* Profesional Adjunto Conicet

* Alumno UNT.

† Investigador Conicet

** Instituto Unsa-Conicet

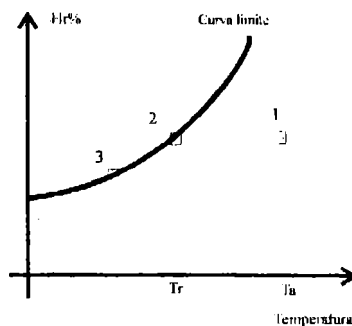


Fig. 1. : Cambio de humedad para distintas temperaturas.

Todos los estados ubicados debajo de la curva de saturación, solo contienen vapor de agua en la masa de aire húmedo. Los estados ubicados por encima de ésta curva o en su proximidad pueden tener estados inestables o de sobresaturación. Observando la figura 1, y considerando un estado determinado por debajo de la curva de saturación (estado 1), la masa de aire correspondiente tendrá una humedad menor a la humedad de saturación correspondiente a esa temperatura (T_a). Supongamos que realizamos un enfriamiento de la masa de aire manteniendo la humedad constante (tramo 1-2), el valor encontrado sobre la curva de saturación (estado 2), es el correspondiente a la temperatura del punto de rocío (T_r). Ahora veamos lo que sucede si una vez encontrado este valor de temperatura seguimos enfriando la masa de aire húmedo (tramo 2-3). Se producirá entonces una separación de las fases líquida y gaseosa y el aire húmedo quedará con menor humedad que la que tenía inicialmente.

La mayoría de los sensores electrónicos del punto de rocío son del tipo *superficie enfriada y condensación*, o del tipo *disolución de cloruro de litio saturada*. En el trabajo se desarrolla el método de superficie enfriada y condensación que se explicará. El método consiste en enfriar una superficie cuya temperatura se puede medir, hasta que se produzca el efecto de condensación sobre ella. Llegado a este estado, se mide la temperatura de la superficie (temperatura de rocío buscada).

CIRCUITO ENFRIADOR

Teniendo en cuenta que se considera necesario obtener una disminución de temperatura o mejor dicho una pérdida de calor sobre una superficie determinada, resulta de suma utilidad considerar un circuito de enfriamiento. Este circuito está formado básicamente por un dispositivo refrigerador llamado “celda peltier”, alimentado por una fuente de corriente (Figura 2).

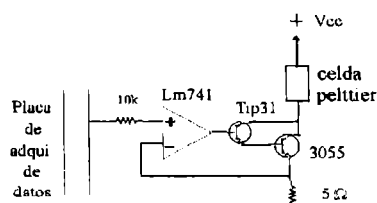


Fig. 2. : circuito refrigerador

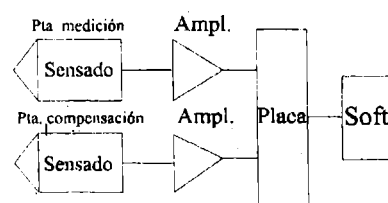


Figura 3.: esquema de medida

Tal como se ve en el circuito, la corriente que atraviesa la celda peltier es variada desde la placa de adquisición de datos. Esta variación, es controlada para producir un mayor enfriamiento de una de las caras hasta llegar a la temperatura deseada (punto de rocío). Las propiedades de la fuente de corriente son calculadas en base a la información de la celda Peltier utilizada y de acuerdo a la temperatura a la que se desea llegar (en °C). La peltier utilizada tiene entre otras las siguientes características: dimensiones físicas: 15 x 30 x 15 mm x 3.2 mm, diferencia de temperatura máxima de una cara a la otra: $\Delta T_{\text{máx}} = 67^\circ\text{C}$, corriente máxima admisible: $I_{\text{máx}} = 3\text{ A}$. De acuerdo a los datos extraídos de la celda utilizada, se diseña y calcula una fuente de corriente cuyo valor máximo es de $I_{\text{máx}} = 2\text{ A}$.

MEDICIÓN Y CÁLCULO DE TEMPERATURAS

Considerando que el método consiste en hacer bajar la temperatura del espejo en forma artificial hasta el valor del punto de rocío rápidamente, la medición de la temperatura de la superficie enfriada, se realiza utilizando como elemento sensor una termocupla, adoptada por su rapidez de establecimiento, linealidad en el rango deseado, costo, etc. El método de compensación usado en esta oportunidad es por software, ingresando a la PC mediante los canales de entrada analógica de la placa adq., los datos de temperatura de la “punta de medición” y de la “punta de referencia” por separado (Figura 3).

Para conseguir la ganancia calculada, se utiliza un amplificador operacional “chopper” por sus características de alta ganancia, bajo offset y para evitar de esta manera posibles errores ocasionados por la deriva térmica. La determinación de la otra temperatura, se realiza utilizando como elemento sensor una “Resistencia de Platino”, alimentada por una fuente de corriente. La corriente excitadora debe ser pequeña (del orden de los μA) para no provocar sobre la Rpt un efecto de “autocalentamiento”.

Para el diseño, se utiliza el LM334 como fuente de corriente ajustable por el usuario. Este dispositivo opera con tensiones de alimentación que van desde 1V hasta 40V y posee una variación lineal con la temperatura. Para compensar esta variación se coloca en el circuito un diodo de silicio, adoptándose una corriente del orden de 50uA.

El coeficiente de resistencia de la R_{pt} en función de la temperatura es de aproximadamente $0,4 \text{ ohm}/^{\circ}\text{C}$. Se sabe además que la R_{pt} tiene un valor de 100 ohm a una temperatura de 0°C . Teniendo en cuenta la salida de la fuente de corriente se tiene: $V_{rpt} = I_{out} \times R_{pt}$

$$\Delta V_{R_{pt}} (^{\circ}\text{C}) = 18,08 \text{ uV}/^{\circ}\text{C}$$

El rango de variación de la placa como se dijo es de $\pm 10 \text{ V}$, del cual se tomará solamente de 0 a 10 V para las temperaturas de 0°C a 50°C . A partir de esto podemos encontrar la amplificación adecuada:

$$\text{Amp1} = \Delta V_{\text{placa}} / \Delta V_{rpt} = 1,111, \text{ considerando la amplificación de la placa de "x10"}$$

Este amplificador es similar que el realizado para la punta de medición de la termocupla.

Considerando los valores extremos de medida sobre la resistencia y la amplificación calculada obtenemos:

$$V_{out}(0^{\circ}\text{C}) = 4,999 \text{ V} \sim 5 \text{ V} \quad V_{out}(50^{\circ}\text{C}) = 5,999 \text{ V} \sim 6 \text{ V}$$

Si se hace la diferencia de estos valores obtenemos 1 Volt., el cual multiplicado por "x10" de la placa, ésta entrega una variación de 0 a 10 V deseada. Para ello se debe realizar una compensación de la medición para obtener los valores correctos.

Los anteriores indican claramente cual es el valor de compensación: $V_{comp} = 5 \text{ V}$. Este valor se obtiene mediante un circuito de compensación utilizando un C.I. LM 1403. El coeficiente del conjunto es: $\text{Coef1} = \text{Coef0} \times \text{Amp1} = 18,08 \text{ uV}/^{\circ}\text{C} \times 11,111,11 \sim 200 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

De la misma manera que para el caso de la punta de medición, se obtiene un nivel de señal de ruido indeseado, por lo que se hace necesario proceder de igual forma que en el caso mencionado, colocando un "filtro pasa bajo" de 2° orden. La detección del cambio de fase o instante de condensación, puede realizarse por varios métodos. Estos métodos, requieren siempre de una superficie sobre la cual se producirá el efecto de condensación. La superficie usada para esta situación es un espejo acoplado térmicamente a la cara fría de la celda peltier siendo el elemento sensor un dispositivo "opto-reflectivo" CNY70. De otra manera, al empañarse el espejo se produce una desviación del haz infrarrojo que recibe el fototransistor, produciendo una valor leible que se compara contra un valor fijo (de referencia) al cual se produce dicho cambio.

Al dispositivo opto-reflectivo se lo opera a una frecuencia aproximada de 1Khz, generada por un Timer C.I. LM 555. De esta forma se evitan posibles señales no deseadas como por ejemplo ruidos producidos por la señal de red (50Hz). El fototransistor se opera con un "filtro pasa alto" de aproximadamente 600Hz para que lleguen solo señales deseadas. Estas señales se rectifican, pues se necesita un valor continuo con la variación o no de la reflexión entre el diodo y el transistor. Una vez que se obtiene el valor rectificado de reflexión, se amplifica esta señal por ser insuficiente para su comparación. La comparación, es realizada a través de un operacional, teniendo salidas altas y bajas de acuerdo a la fuente de alimentación del operacional (-5V a 12V). En este caso también se utiliza el LM1403 para obtener el valor con el cual se comparará la salida de tensión detectada por el empañamiento del espejo. El valor de referencia se puede variar con un potenciómetro, es decir que éste potenciómetro es el encargado de la calibración del valor de Temperatura de Rocío.

Al ser éste un parámetro que varía en forma muy lenta (en relación a la rapidez de los sensores de temperatura), se usa como elemento sensor una resistencia de platino. El método de traducción y lectura es el mismo que el utilizado para la medición de la temperatura de la punta de referencia (masa térmica). Esto es debido a que el rango de medición dispuesto para ambos casos es el mismo (de 0°C a 50°C) con la placa configurada para un uso bipolar de $\pm 10 \text{ V}$. El valor conseguido por esta lectura, ingresa a la placa de toma de datos a través de otro canal analógico, es decir por la entrada ADC.

DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD

La humedad se determina utilizando sencillas fórmulas matemáticas¹, para los cuales es de fundamental importancia la medición de los parámetros anteriores. Este cálculo se realiza a través de la PC con "lenguaje C++". Las ecuaciones utilizadas para el cálculo son las siguientes:

Presión de Saturación del vapor de agua (Pws): para un rango de temperatura entre 0 y 200°C está dado por:

$$\ln(Pws) = C_8/T + C_9 + C_{10} \cdot T + C_{11} \cdot T^2 + C_{12} \cdot T^3 + C_{13} \cdot \ln(T) \quad (1)$$

Relación de Humedad: $W = 0,62198 \cdot Pw / (P - Pw)$ (2); $Pw = Pws(T_r)$ es la presión de aire húmedo T_r [$^{\circ}\text{K}$]

Relación de Humedad de Saturación: $Ws = 0,62198 \cdot Pws / (P - Pws)$ (3)

Grado de Saturación: $u = W / Ws$ | $T, P = C_{10}$

Humedad Relativa: $\phi = u / [1 - (1 - u) \cdot Pws / P]$ (5), ϕ y u son 0 y 1 para aire seco húmedo respectivamente.

Debemos mencionar que estas ecuaciones para el cálculo de las propiedades del aire húmedo, son consecuencia de considerar el uso de las Relaciones de los "Gases Perfectos o Ideales".

CALIBRACIÓN, ERRORES Y CONCLUSIONES

La placa de adquisición de datos es configurada desde la PC en lenguaje C especialmente para esta aplicación, es decir que se configuran los canales analógicos de entrada con la ganancia deseada, canal analógico de salida (control) y entrada digital

¹ Las ecuaciones para la determinación de los parámetros necesarios para el cálculo de la humedad, fueron extraídas del manual "Ashrae"[4].

(control). Los valores de tensión obtenidos para distintas temperaturas, determinarán la calibración del sistema formado por sensor y traductor. Los valores de temperatura se obtienen a partir de calibradores, uno de ellos **Refrigerante**, los cuales tienen un error menor a 0.1°C. Para temperaturas por arriba del ambiente se usa un **"Calibrador Calentador"**. De la misma forma, se calibran las resistencias de platino que determinan la temperatura del medio ambiente y la temperatura de la masa térmica (referencia). Una vez realizadas estas tareas, se determina el error efectuado en la medición. Esto se lleva a cabo mediante la elaboración de la mejor curva, que se obtiene a partir de una **"Regresión matemática"** con el utilitario **"Qpro for Windows"**. A partir de ésta regresión se obtiene el σ (error cuadrático medio) y a partir de éste y del número de mediciones se calcula el error de la medición o la cota para éste parámetro. La ecuación es $\text{error} = \sigma / N^2$.

Para la calibración del instrumento, se utilizan distintos tipos de soluciones salinas, para las cuales están calculadas las respectivas humedades a una determinada temperatura. Para ello se adaptan los dispositivos sensores de temperatura de rocío y temperatura ambiente en un recipiente en el que también se pondrán las distintas soluciones (saturadas) que se detallarán más adelante. Debido a que éste recipiente debe permanecer a una temperatura determinada, es que se utiliza un recipiente conductor de temperatura, de manera tal que al sumergirlo en el "calibrador enfriador" (agua) y manteniendo la temperatura del mismo, se logre en el interior del recipiente una temperatura constante y de un valor determinado. Además hay que tener en cuenta que una vez introducido en el recipiente todo lo antes mencionado (sensor de temperatura de rocío, temperatura ambiente, y solución salina saturada), para comenzar con el proceso de medición se debe esperar un tiempo considerable (aproximadamente 12 horas) para que en su interior se cree un ambiente totalmente homogéneo de humedad. Como se vio, la temperatura de rocío es calculada a partir de la suma de la temperatura de la punta de medición de la termocupla y la temperatura de la masa térmica. Los errores aquí mencionados, son los calculados de acuerdo a la regresión matemática realizada anteriormente. Por lo tanto el error será: $Tr = T_{pm} + T_{rpt}$, $\Delta Tr^1 = \Delta T_{pm} + \Delta T_{rpt} \approx 0.4^\circ\text{C}$
Temperatura Ambiente: el único error que se manifiesta es el ocasionado por la **Rpt100** $\Delta Ta = \Delta T_{rpt} \approx 0.3^\circ\text{C}$

Ahora lo que se debe buscar es cuánto afectan estos errores la determinación de la **Humedad relativa**, y esto se logra haciendo la diferencial total de $\phi(T, Tr)$ (ecuación 5). El valor del error será: $\Delta\phi = 0.009$, que corresponde a la cota para la humedad, y el error absoluto es: $\Delta\phi / \phi = 0.017$, Para esas variaciones de Ta y Tr .

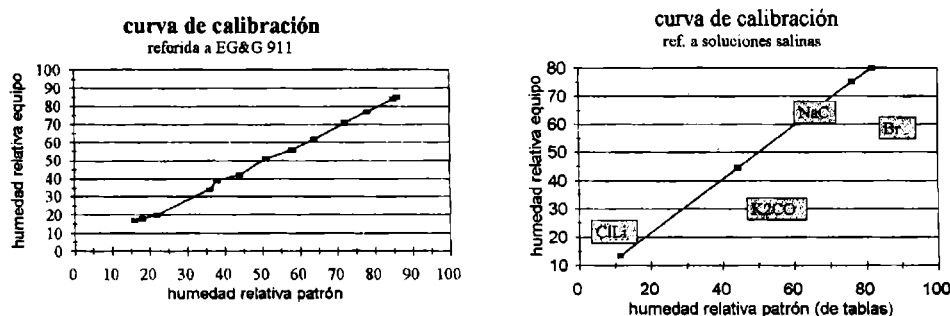


fig. 4: curvas de calibración y contraste

La aplicación fundamental del instrumento, será como calibrador de sensores de humedad, realizando mediciones para distintas clases de ambientes creados para usos determinados. De la figura 4, se observa que el dispositivo funciona adecuadamente considerando que la gráfica solo representa un día de medidas. Se observa un ligero aplastamiento de curva en los extremos, que habrá que subsanar. El instrumento patrón usado como calibrador también es del tipo "sensor de punto de rocío". El costo del equipo sin la placa adquisidora, ni la computadora ronda en los ochocientos pesos.

REFERENCIAS

- Threlkeld, James L. (1984). Ingeniería del Ámbito Térmico. Traducción y Adaptación por Ing. José E. Ruge Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Editorial Prentice/Hall Internacional.
- Norton, Harry N. (1992). Sensores y Analizadores. Colección Elec./Informática. Versión Castellana por José A. Rubio Sola y Isidro Roselló Martos, Profesores de la E.T.S.I.I.B. Editorial Gustavo Gili, S.A.
- Apuntes de Cátedra Facultad de Ingeniería U.B.A. (1.969). "Aire Húmedo". Centro de Estudiantes de Ingeniería.
- Ashrae Handbook. 1.989 Fundamentals.

¹ ΔTr : cota para el valor de la temperatura del punto de Rocío.